

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - ECV
ENGENHARIA CIVIL

Fernanda Roberti

**EFEITO DE MICROFIBRAS DE AÇO NA RETRAÇÃO AUTÓGENA DE
CONCRETOS DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO**

FLORIANÓPOLIS

2019

Fernanda Roberti

**EFEITO DE MICROFIBRAS DE AÇO NA RETRAÇÃO AUTÓGENA DE
CONCRETOS DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Pelisser.

Coorientadora: M.Sc. Vanessa Fernandes Cesari.

Florianópolis, 2019.

Ficha de identificação da obra

Roberti, Fernanda
EFEITO DE MICROFIBRAS DE AÇO NA RETRAÇÃO AUTÓGENA DE
CONCRETOS DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO / Fernanda Roberti ;
orientador, Fernando Pelisser, coorientador, Vanessa
Fernandes Cesari, 2019.
65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Concreto de ultra-alto
desempenho. 3. Retração autógena. 4. Microfibras de aço. 5.
Desempenho mecânico. I. Pelisser, Fernando. II. Cesari,
Vanessa Fernandes. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Fernanda Roberti

**EFEITO DE MICROFIBRAS DE AÇO NA RETRAÇÃO AUTÓGENA DE
CONCRETOS DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheira Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 14 de novembro de 2019.

Prof^a. Luciana Rohde, Dr.

Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Fernando Pelisser, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Vanessa Fernandes Cesari, M.Sc.

Coorientadora

Universidade Federal de Santa Catarina

Paulo Ricardo de Matos, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Roberto Caldas de A. Pinto, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meu pais, Marlete Correia Roberti e Izaias Roberti por todo o empenho, carinho e suporte incondicional nesses cinco anos, para que eu pudesse ter a melhor experiência possível na graduação. Agradeço também minhas irmãs, Suzayne Roberti e Ana Maria Roberti pelos conselhos e amizade. À minha parceira e melhor amiga nesse TCC, Marianna Sacavem, pelo carinho incondicional.

Ao meu orientador, Fernando Pelisser, por ter aceito me orientar, mesmo em situações tão adversas. Por nunca ter medido esforços para me ajudar e sempre se mostrar disposto a esclarecer todas as dúvidas possíveis. A minha coorientadora Vanessa Fernandes Cesari, por toda paciência, ajuda com experimentos e esclarecimentos. Aos bolsistas Malu Beatriz Scherner e Gabriel Fernando Costa por sempre se mostrarem a disposição.

Aos membros da banca, Roberto Pinto e Paulo Ricardo de Matos, por aceitarem avaliar meu trabalho e pelas contribuições oferecidas.

Aos colegas do GTec, por terem me iniciado na pesquisa acadêmica e me fazerem apaixonar por concreto ainda no início da graduação, Paulo Ricardo de Matos, Eduardo Graeff, Paula Salum, Lucas Onghero, Rafael Dors Sakata, Ronaldo Pillar e Rudiele Schankoski. Em especial ao professor Luiz Roberto Prudêncio Jr, pelos diversos ensinamentos e experiências incríveis durante dois anos de iniciação científica.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) e Laboratório de Aplicação de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC), ambos da UFSC, por disponibilizarem equipamentos e espaço para realização dos ensaios. À Vanessa de Amorim, Alex Taira e Giovanni Ramos por todo o suporte na hora de executar os ensaios.

Às amigas Christiane Ramme Bortoluzzi e Isabela Tonioli Bianchini por me receberem em sua casa nesse último semestre, possibilitando minha estadia em Florianópolis.

RESUMO

O concreto de ultra alto-desempenho (CUAD) é uma categoria de material com elevada durabilidade, resistência à compressão de no mínimo 120 MPa e elevada resistência à tração. Para alcançar tais características, o mesmo é dosado com baixa relação água/aglomerante, aditivos superplastificantes, agregados miúdos e geralmente fibras de aço. No entanto, as características da composição, potencializam o fenômeno da retração autógena, que podem provocar micro e microfissuras de forma significativa, reduzindo a vida útil do elemento estrutural. Visando mitigar esse problema, diversos estudos têm investigado o efeito das microfibras de aço, de modo que esta atue não só no desempenho à tração e ductilidade, mas também na retração. O objetivo principal desse trabalho foi averiguar os efeitos da concentração de microfibras de aço na retração autógena (0, 0,75 e 1,5% em volume), em concretos com relação água/cimento (a/c) de 0,20 e 0,30. Foram determinadas a retração autógena (28 dias), índice de consistência, teor de ar incorporado, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade dinâmico. Os resultados mostraram que a incorporação de fibras em ambos os casos reduziu a retração autógena nos concretos, chegando à uma redução aproximada de 22% para $a/c = 0,20$ e 11% para $a/c = 0,30$. As microfibras de aço promoveram aumento de até 47% na resistência à tração e de 23% na resistência à compressão. Estes resultados mostram o potencial das microfibras de aço para melhorar o desempenho frente à retração autógena e desempenho mecânico dos concretos aplicados em estruturas.

Palavras-chave: concreto de ultra-alto desempenho, retração autógena, microfibras de aço.

ABSTRACT

The ultra-high performance concrete (UHPC) is a material with improved durability, compressive strength between 120 and 150 MPa and high tension strength. For this, the concrete is composed by low water-binder ratio, superplasticizer, fine aggregates and steel microfibers. However, this mix design improves the autogenous shrinkage effect which can significantly cause fissures, reducing the useful life of structural concrete. To mitigate this problem, a lot of studies have been investigating the effect of steel microfiber, seeing if it helps in ductility, tension and also in shrinkage. The main goal of this paper was to analyze the effect of different steel microfiber dosages in autogenous shrinkage ($v_f = 0\%$, $v_f = 0,75\%$, $v_f = 1,5\%$). Also, was analyze two types of water/ciment ratio (w/c), of 0,20 and 0,30. Autogenous shrinkage was determined (until 28 days), incorporated air, fluidity (flow table test), dynamic elastic modulus, tension and compressive strength. Results indicated that $v_f = 0,75\%$ and $v_f = 1,5\%$ content of steel microfiber reduces the autogenous shrinkage about 22% for w/c = 0,20 and about 11% for w/c = 0,30. The microfibers improved the tension strength in 47% and compressive strength in 23%. These properties show the potential of steel microfibers to improve the performance of concrete applied to structures.

Keywords: ultra-high performance concrete, autogenous shrinkage, steel microfibers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação das fibras de aço: (a) fibra reta, (b) fibra corrugada, (c) fibra com ancoragem nas extremidades.	20
Figura 2 – Microestrutura do concreto submetido a tração.....	25
Figura 3 – Microfibras de aço.	33
Figura 4 – Fluxograma do programa experimental.	34
Figura 5 – Argamassadeira planetária.....	36
Figura 6 – Aparato medidor de retração.	37
Figura 7 – Mesa para índice de consistência – Dimensões em mm.....	39
Figura 8 – Molde prismático.	40
Figura 9 – Moldes cilíndricos.	41
Figura 10 – Equipamento Sonelastic®.	41
Figura 11 – Montagem do ensaio de tração na flexão.....	42
Figura 12 - Prensa Universal Shimadzu.	43
Figura 13 – Retração autógena das misturas.....	46
Figura 14 – Concretos no estado fresco.....	48
Figura 15 - Teor de ar incorporado e abertura na mesa de índice de consistência.....	48
Figura 16 – Módulo de elasticidade dinâmico.....	51
Figura 17 – Resultados de resistência à tração na flexão.	52
Figura 18 – Ruptura dos CPs no ensaio de tração.	52
Figura 19 – Resistências à compressão.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados de resistência à compressão.	24
Tabela 2 – Características do cimento fornecidas pelo fabricante.	31
Tabela 3 – Frações granulométricas da areia.	32
Tabela 4 - Características do aditivo.	32
Tabela 5 – Quantitativos para produção de 1m ³ de CUAD.....	35
Tabela 6 – Resultados da retração autógena média (aos 28 dias).	46
Tabela 7 – Resultados de ensaios no estado endurecido.	50

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a/c – Relação água/cimento

a/ag – Relação água/aglomerante

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AFGC – Associação Francesa de Engenharia civil

CP – Corpo de prova

CUAD – Concreto de Ultra- Alto desempenho

CUADRF - Concreto de Ultra- Alto desempenho Reforçado com Fibra

LVDT – Transformador Diferencial Variável Linear

MPa – Mega Pascal

N/A – Não se aplica

NBR – Norma Brasileira

Rpm – Rotações por minuto

V_f – Volume de fibra

ZT – Zona de Transição

% m.c – percentual calculado sobre a massa de cimento

Ca (OH)_2 – Hidróxido de cálcio

C-S-H – Silicatos de Cálcio Hidratado

λ - fator de forma da fibra

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos.....	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	Concreto de ultra-alto desempenho (CUAD)	15
2.1.1	Histórico e princípios básicos.....	15
2.1.2	Materiais constituintes.....	16
2.1.2.1	Cimento	17
2.1.2.2	Agregados	17
2.1.2.3	Aditivos	18
2.1.2.4	Adições minerais	19
2.1.2.5	Fibras de aço.....	19
2.1.3	Microestrutura.....	21
2.1.3.1	Pasta de cimento	21
2.1.3.2	Zona de transição	22
2.1.3.3	Agregados	22
2.1.4	Propriedades no estado endurecido.....	23
2.1.4.1	Resistência à compressão.....	23
2.1.4.2	Resistência à tração	25
2.1.4.3	Módulo de elasticidade	26
2.2	Retração autógena	27
3	Programa experimental.....	31
3.1	Materiais	31

3.1.1	Cimento	31
3.1.2	Areia	32
3.1.3	Aditivo	32
3.1.4	Fibra	32
3.2	Métodos	33
3.2.1	Dosagem e mistura	34
3.2.2	Ensaio de retração autógena	36
3.2.3	Ensaio no estado fresco	37
3.2.3.1	Teor de ar incorporado	38
3.2.3.2	Determinação da consistência (<i>Flow table test</i>)	39
3.2.4	Ensaio no estado endurecido	40
3.2.4.1	Módulo de elasticidade dinâmico.....	41
3.2.4.2	Resistência à tração na flexão.....	42
3.2.4.3	Resistência à compressão.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	Retração autógena	45
4.2	Estado fresco.....	47
4.2.1	Teor de ar incorporado e espalhamento	47
4.3	Estado endurecido.....	50
4.3.1	Módulo de elasticidade dinâmico	50
4.3.2	Resistência à tração na flexão	51
4.3.3	Resistência à compressão	53
5	Conclusões	55
5.1	Considerações finais	55
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	56

6	REFERÊNCIAS.....	57
7	APÊNDICES.....	62

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado pelo homem, sendo uma ótima opção para diferentes tipos de obras. Porém, os avanços tecnológicos alcançados nas últimas décadas possibilitaram especificações de estruturas cada vez mais arrojadas, que muitas vezes não são atendidas pela mistura convencional. Foi nesse cenário que surgiu a necessidade de materiais como o concreto de ultra-alto desempenho, também chamado de CUAD (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Apesar do seu advento a partir da década de 90, ainda não há uma definição universalmente aceita entre os pesquisadores e profissionais da área sobre o que é um CUAD¹. O que geralmente é de consenso, refere-se aos padrões elevados de durabilidade e desempenho mecânico do material, que deve atingir no mínimo entre 120 MPa e 150 MPa de resistência à compressão aos 28 dias, além de apresentar bom comportamento à ductilidade quando sob efeitos de tração (WU; SHI; KHAYAT, 2019; ZHANG; LIU; WANG, 2019).

Para alcançar tais propriedades, a produção desses concretos é feita utilizando uma quantidade elevada de cimento e adições minerais, baixa relação água/aglomerante (a/ag), aditivos superplastificantes, agregados miúdos e fibras de aço (RICHARD; CHEYREZY, 1995). Contudo, ao utilizar esse método de dosagem, o efeito da retração autógena aumenta consideravelmente. Sabe-se que esse fenômeno é um dos responsáveis pelo encolhimento de peças concretadas, e que se estas estiverem restringidas, podem vir a fissurar, causando a deterioração da estrutura (NEVILLE, 2013).

Assim, visando mitigar este problema, diversos autores têm investigado soluções para diminuir o efeito da retração autógena em CUADs. Dentre estes estudos, o efeito das microfibras de aço como agente mitigador da retração autógena vem sendo cada vez mais testado. Com isso, as fibras que supostamente atuariam para proporcionar maior resistência à tração e ductilidade, também passam

¹ Para alguns autores, quando se utiliza o termo CUAD, automaticamente se está referindo a um composto cimentício reforçado com fibra. Porém, alguns outros preferem utilizar a nomenclatura CUAD apenas para o composto de concreto, utilizando a sigla CUADRF (Concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçado com Fibra), quando a mistura possuir fibras. No presente trabalho, será utilizado sempre o termo CUAD, sendo indicado a utilização de fibras, quando houver.

a ter um papel importante na retração. Dessa forma, o presente trabalho visa contribuir ainda mais nesse assunto, averiguando o fenômeno da retração autógena em concretos de ultra-alto desempenho confeccionados com diferentes concentrações de microfibras de aço.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Verificar o efeito de microfibra de aço na retração autógena de concretos de ultra-alto desempenho (CUAD).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Produzir CUADs com características adequadas no estado fresco, utilizando diferentes teores de microfibra;
- Avaliar o efeito da concentração de microfibra de aço na redução da retração autógena em CUADs;
- Verificar o efeito da relação água/cimento na retração autógena;
- Desenvolver materiais de construção mais eficientes e duráveis;

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Concreto de ultra-alto desempenho (CUAD)

O CUAD é uma categoria de material cimentício, que apresenta alta resistência, durabilidade, ductilidade e bom desempenho no estado fresco (RICHARD; CHEYREZY, 1995). Este teve seu estudo pioneiro realizado na França e de acordo com a AFGC (*Association Francaise de Genie Civil* ou Associação Francesa de Engenharia Civil, 2002), o CUAD é um concreto reforçado com fibra de aço, com resistência à compressão maior que 150 MPa, apresentando bom comportamento quanto à ductilidade, quando sob efeito de tração.

O uso desse material é vantajoso quanto a sua vida útil, pois proporciona maior durabilidade, reduzindo a necessidade de reparos e postergando uma eventual intervenção (MATOS; SAKATA; PRUDÊNCIO Jr., 2019). De acordo com Azmee e Shafiq (2018), o CUAD é usualmente utilizado na confecção de pontes, edifícios e elementos pré-fabricados. Neste último caso, há possibilidade de produzir peças delgadas, vencendo grandes vãos com componentes mais leves. Assim, apesar das grandes dimensões, há uma maior facilidade no transporte e montagem dos produtos, pois o elemento tem sua massa reduzida devido a menor espessura utilizada (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

2.1.1 Histórico e princípios básicos

De acordo com Yoo e Banthia (2016), os primeiros concretos de ultra-alto De acordo com Yoo e Banthia (2016), os primeiros concretos de ultra-alto desempenho começaram a ser desenvolvidos em meados da década de 80. Na época, com um aumento no desempenho das pozolanas e o advento dos superplastificantes, passou a ser possível produzir misturas com baixa porosidade e elevada resistência à compressão. Os primeiros materiais desse tipo foram o DSP (*Densified with Small Particles* ou Densificado com Partículas Pequenas) e o MDF (*Macro Defect Free* ou Livre de Macro Defeitos), ambos atingindo resistências à compressão entre 120 e 270 MPa.

Já na década de 90, o CPR (Concreto de Pós Reativos), foi desenvolvido por Richard e Cheyrezy , onde atingia resistência a compressão de até 800 MPa, quando curados sob temperaturas de 800 °C e pressão de 50 MPa. Atualmente, o CPR é vendido comercialmente com o nome de Ductal®, sendo o mesmo considerado o precursor do CUAD, devido à implementação de fibras a sua composição. É válido salientar que o procedimento para o desenvolvimento do DSP, MDF e CPR é bastante similar, ou seja, todos eles utilizam partículas bastante finas, têm um elevado consumo de adição mineral e aditivo superplastificante, utilizando relação a/ag (água/aglomerante) entre 0,10 e 0,20 em massa (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011; YOO; BANTHIA, 2016).

Dessa forma, Richard e Cheyrezy (1995) elencaram alguns parâmetros que são comuns a maioria dos CUADs:

- Utilizar um alto consumo de cimento, sílica ativa e pó de quartzo finamente moído;
- Fazer uso de relação a/ag, em torno de 0,20;
- Não usar agregados graúdos na mistura, devendo-se utilizar areias com diâmetro máximo de 2 mm, a fim de melhorar a interface pasta/agregado na zona de transição;
- Empregar uma distribuição granulométrica adequada, de modo a melhorar o empacotamento das partículas;
- Aplicar cura térmica, de modo a acelerar as reações de hidratação das partículas de cimento e adições pozolânicas.

2.1.2 Materiais constituintes

De acordo com Tutikian, Isaia e Helene (2011), a seleção de materiais para produção de CUAD é de extrema importância para o seu bom desempenho, sendo o mesmo usualmente composto por cimento, adições minerais, agregado miúdo, aditivo superplastificante e fibras de aço. Do ponto de vista granulométrico, o CUAD pode ser considerado uma argamassa, porém devido ao seu desempenho muito superior ao concreto convencional, o termo concreto prevaleceu para esse material.

2.1.2.1 Cimento

Para a produção de CUADs, buscam-se os cimentos com menores teores de adições, visando atingir elevados desempenhos mecânicos. Atualmente, o aglomerante comercialmente disponível no Brasil que chega mais perto dessa condição é o CP V ARI. No entanto, este apresenta uma elevada finura, demandando uma grande quantidade de água. Alternativamente, recomenda-se o uso de CP II, visto que o mesmo não é tão fino, demandando assim menos água, porém pode não atingir a resistência mecânica esperada. Dessa forma, o ideal é que, antes de produzir um CUAD faça-se um estudo preliminar, de modo a verificar quais as vantagens e desvantagens de cada tipo de cimento disponível (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Recomenda-se também, utilizar cimentos com baixos teores de aluminato tricálcio (C_3A), visto que este componente libera calor de hidratação de forma rápida, podendo causar problemas em um concreto que utiliza uma grande quantidade de cimento por metro cúbico (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Ainda, de acordo com Kang *et al.* (2019), para a produção de um metro cúbico de CUAD, usualmente se emprega de 700 a 1000 quilogramas de cimento, variando conforme a quantidade de adição mineral e agregados empregados.

2.1.2.2 Agregados

O agregado de quartzo é o mais recomendado para a produção de CUADs, pois o mesmo apresenta elevada dureza e resistência à compressão, quando comparado a outros tipos de materiais disponíveis. O mesmo pode ser utilizado tanto como areia, quanto como pó, visando neste último caso, uma melhor compacidade à mistura (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

De acordo com Tutikian, Isaia e Helene (2011), a produção de CUADs é feita com agregados de tamanho reduzido, de modo a aumentar a homogeneidade do concreto e diminuir a sua zona de transição. Para Richard e Cheyrezy (1995), a areia natural com partículas entre 0,15 e 0,60 mm é a mais recomendada, pois apresenta grãos esféricos, consumindo menos água.

No entanto, outros tipos de agregados vêm sendo estudados para utilização nesse tipo de concreto. Yang et. al (2019) analisaram CUADs produzidos com areia de britagem em substituição parcial da areia natural. Percebeu-se que para substituições de 50%, o empacotamento da mistura se alterava e a retração autógena crescia em mais de 39%. Todavia, com relação à resistência à compressão aos 28 dias, as misturas feitas apenas com areia natural alcançaram 118 MPa, enquanto aquelas com percentual de substituição de areia de britagem maior que 40%, chegaram a 134 MPa.

2.1.2.3 Aditivos

Para a produção de concretos com menor relação a/ag e menor volume de água por metro cúbico de mistura, se recomenda os aditivos superplastificantes, sendo os mais eficientes aqueles à base de policarboxilatos. Estima-se que na utilização desse componente, a redução de água fique entre 25% e 35%, com a mistura mantendo a mesma trabalhabilidade (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011; NEVILLE, 2013).

De acordo com Tutikian, Isaia e Helene (2011), para a dosagem de CUADs, deve-se encontrar o ponto de saturação do aditivo, ou seja, a quantidade de aditivo a partir da qual não se tem mais a função de plastificante na mistura, atuando apenas como água. Com o volume de aditivo otimizado, pode-se reduzir a relação a/ag, de modo a alcançar melhores desempenhos mecânicos.

Com relação à dosagem, há uma variação no percentual utilizado, dependendo dos materiais e do tipo da mistura, mas usualmente são empregados valores entre 1% e 4%, calculados com base na massa de cimento (RUSSELL; GRAYBEAL, 2013). Vale ressaltar ainda que a escolha do superplastificante deve ser feita com base na compatibilidade com o cimento utilizado na mistura (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

2.1.2.4 Adições minerais

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011), para densificar a microestrutura de CUADs, são utilizadas adições minerais conhecidas como “superpozolanas”, tais como sílica ativa, metacaulim e cinza da casca de arroz. Estas, usualmente são implementadas como aglomerantes, substituindo parte do cimento utilizado na mistura.

Fisicamente, as pozolanas citadas possuem grãos de pequena dimensão, que auxiliam na formação de pontos de nucleação às partículas de cimento, de modo que o processo de hidratação ocorre de forma mais homogênea. Quimicamente, as pozolanas conseguem consumir o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de cálcio), formado após a hidratação do cimento, formando como produto o C-S-H (silicatos de cálcio hidratados), elemento responsável pela resistência da pasta (NEVILLE, 2013).

Na fabricação de CUADs, a adição mais utilizada é a sílica ativa, devido aos seus grãos serem bem arredondados e com diâmetro até 100 vezes menor que o cimento. A substituição pode ser feita em quantidades de até 25%, pois apesar de nessas condições não haver mais $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a ser consumido, a sílica age através do efeito micro filer, preenchendo pequenos vazios do compósito (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

2.1.2.5 Fibras de aço

O concreto é um material marcado pelo seu comportamento frágil. Além disso, macro e microfissuras que podem ocorrer no interior do material, fazem com que a sua capacidade de resistência à tração seja muito menor do que à compressão. Assim, a inserção de fibras no compósito surge como uma das alternativas para minimizar este problema. Quando utilizadas no teor, comprimento e material adequados, estas diminuem a velocidade de propagação das fissuras e proporcionam ao concreto um comportamento pseudo-dúctil, ou seja, o material passa a ter capacidade resistente após a sua fissuração (FIGUEIREDO, 2011).

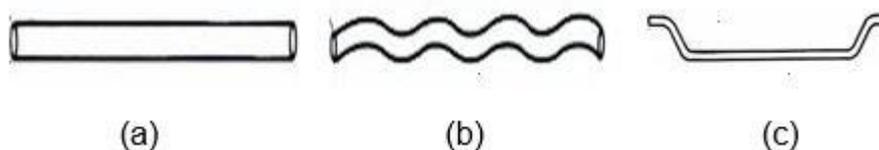
De acordo com Figueiredo (2011), as fibras são peças de comprimento muito maior do que a sua seção transversal, sendo produzidas por diferentes

materiais, tais como aço, vidro, polipropileno, náilon e outros. Seu módulo de elasticidade e resistência mecânica são as duas propriedades que mais influenciam na escolha de qual fibra utilizar para cada tipo de mistura. Isso porque só são consideradas apropriadas para reforço do concreto aquelas que apresentam maior capacidade de deformação na ruptura e maior resistência à tração do que a matriz de concreto em si.

Deve-se ater ainda à geometria da fibra utilizada, que geralmente é caracterizada pelo fator de forma (λ), que corresponde à relação entre o comprimento e o diâmetro do círculo cuja área seja equivalente ao da seção transversal da fibra em questão. No geral, quando maior o λ , maior será a capacidade resistente do concreto após a fissuração. No entanto, não se deve aumentar indefinidamente o tamanho da fibra, visto que se recomenda utilizar aquelas com comprimento igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado empregado. Isso faz com que haja compatibilidade dimensional entre os componentes da mistura, facilitando a intercepção das fissuras sem causar prejuízo na trabalhabilidade (FIGUEIREDO, 2011).

De acordo com Tutikian, Isaia e Helene (2011), as fibras de aço são as mais comumente adicionadas aos CUADs, de modo a aumentar a sua ductilidade e resistência à tração, possibilitando a utilização do concreto sem armadura passiva, em caso de estruturas menos espessas (máximo de 2 cm). Usualmente se emprega uma quantidade de até 2% em relação ao volume da mistura, sendo o comprimento e espessura da ordem de 13 e 0,15 mm, respectivamente. Sobre os modelos existentes, a NBR 15530 (ABNT, 2007) classifica as fibras de aço em três tipos, sendo elas retas, corrugadas ou com ancoragem nas extremidades (Figura 1).

Figura 1 – Classificação das fibras de aço: (a) fibra reta, (b) fibra corrugada, (c) fibra com ancoragem nas extremidades.



Fonte: adaptado NBR 15530 (ABNT, 2007).

Com relação à influência das fibras de aço na trabalhabilidade dos CUADs, Zhang, Liu e Wang (2019) testaram diferentes volumes de fibra, porém mantendo a mesma relação a/c (0,18) e quantidade de aditivo (4% m.c.). Os resultados encontrados na mesa de consistência foram de 29 cm, 28 cm, 27 cm, 23,5 cm e 17,5 cm para $V_f = 0\%$, 1%, 1,5%, 2,5% e 3%, respectivamente.

2.1.3 Microestrutura

O princípio básico de funcionamento dos CUADs está relacionado à diminuição dos seus poros internos. Para alcançar tal objetivo são produzidas misturas com menor relação a/ag, agregados otimizados e adições minerais. Obtém-se, então, poros de menor tamanho e com menor interconexão, aumentando a oposição à passagem de fluidos e a fixação de agentes dissolvidos na superfície. As consequências diretas dessas ações são maior resistência mecânica e maior durabilidade (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011), para fazer uma análise mais detalhada da microestrutura dos concretos, sejam eles convencionais ou de alto desempenho, deve-se estudar as três fases da mistura, sendo elas: pasta de cimento hidratada, zona de transição e agregados.

2.1.3.1 Pasta de cimento

A pasta de cimento hidratada é constituída basicamente por produtos hidratados (C-S-H), água, material anidro e poros. Para diminuir a porosidade da mistura, e assim alcançar materiais mais compactos e resistentes, é necessário reduzir a água e ar aprisionados em seu interior. Para concretos de alto e ultra-alto desempenho por exemplo, uma das medidas é utilizar relações a/ag abaixo de 0,30 (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011; VANDAMME, 2008).

Além disso, é importante salientar que a resistência da pasta depende também da quantidade de C-S-H formado. A formação deste componente depende também do grau de maturidade da pasta, que é função da idade e a temperatura a que está submetida a mistura (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

2.1.3.2 Zona de transição

Com relação à zona de transição (ZT), pode-se dizer que é a região de interface entre a pasta e o agregado, e no caso dos CUADs reforçados com fibra, também entre a pasta e as fibras. Essa é considerada a região mais frágil do concreto, porque é nela que a matriz se torna mais porosa, com presença de microfissuras, limitando a resistência mecânica e aumentando a deformabilidade do compósito. Os fatores que mais influenciam na formação da zona de transição são:

- Relação a/c , pois quanto mais água disponível, maior a exsudação e conseqüentemente maior a chance do líquido se acoplar ao redor do agregado ou fibra;
- Dimensão máxima característica do agregado, pois é o fator responsável pela extensão da ZT, sendo maior quando se utiliza agregados de maior dimensão;
- Natureza mineralógica do agregado, visto que a dureza e o módulo de elasticidade do agregado deve ser o mais parecido possível ao da pasta de cimento;
- Método de adensamento (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Nos CUADs a ausência de agregado graúdo aumenta a homogeneidade da mistura, diminuindo a extensão da zona de transição. Ainda assim é recomendável a utilização de adições minerais, que são capazes de fortalecer essa região, como é o caso das superpozolanas (RICHARD; CHEYREZY, 1995; WARNOCK, 2005, LEE; KANG; KIM, 2010).

2.1.3.3 Agregados

Quando se aumenta a resistência do concreto, principalmente melhorando a zona de transição e a pasta de cimento hidratada, o agregado se torna o elo fraco do compósito. Por isso, no caso de concretos de alto e ultra-alto desempenho, é importante a seleção de agregados com elevada resistência mecânica, de modo que as três fases apresentem comportamentos resistentes de mesma grandeza (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

2.1.4 Propriedades no estado endurecido

Sobre o aspecto de comportamento mecânico, os CUADs apresentam excelente resistência à compressão, além de melhor desempenho quando submetidos a esforços de tração, quando confeccionados com fibras. A deformabilidade do material varia para cada caso, podendo ser averiguada através do ensaio de módulo de elasticidade (AFGC, 2013).

2.1.4.1 Resistência à compressão

De acordo com Neville (2013), a resistência à compressão do concreto serve de referência para analisar as suas outras características, pois apesar de em determinadas situações este não ser o fator mais importante, qualquer alteração no desempenho do material reflete diretamente nessa propriedade.

Os CUADs usualmente apresentam resistência à compressão entre 120 e 150 MPa aos 28 dias, sendo que esses valores podem variar conforme o tipo de agregado, o tratamento utilizado na cura, a relação a/ag e o percentual de fibras empregado (YOO; BANTHIA, 2016; ZHANG; LIU; WANG, 2019).

Wu, Shi e Khayat (2019) investigaram as propriedades mecânicas de CUADs, produzidos com diferentes volumes (0%, 1%, 2% e 3%) e tipos de fibras de aço (retas, corrugadas e com ancoragem nas extremidades). Nos compósitos, de relação $a/ag = 0,18$, foram utilizados cimento, sílica ativa, areia natural e aditivo superplastificante, que foi dosado para cada mistura até que se conseguisse um espalhamento entre 24 e 25 cm no ensaio de *mini-slump flow*. Os corpos de prova foram curados em uma solução saturada de cal e água a uma temperatura de 20 °C e ensaiados depois de 28 dias. Os resultados mostraram que houve um aumento gradual na resistência à compressão conforme aumentou-se o volume de fibras. O concreto de referência (aquele sem nenhum tipo de fibra), atingiu resistência de 115,3 MPa, enquanto aqueles produzidos com fibras retas em volumes de 1%, 2% e 3% atingiram 124,8, 142,2 e 152,4 MPa, respectivamente. Os outros dois tipos de fibras apresentaram melhor desempenho do que a fibra reta, sendo que em

volumes de 2% as misturas alcançaram resistências 7% e 8% maiores para corrugadas e com ancoragem, respectivamente.

Zhang, Liu e Wang (2019) também estudaram a resistência à compressão de CUADs utilizando diferentes volumes de fibras de aço (0%, 1%, 1,5 %, 2,5% e 3%). As misturas, de $a/ag = 0,18$, continham cimento, sílica ativa, cinza volante, agregado miúdo e aditivo superplastificante em teor fixado (4% m.c.). Os resultados de resistência à compressão aos 28 dias se apresentam na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados de resistência à compressão.

Mistura	Resistência compressão (MPa)
0 % fibra	130
1% fibra	146
1,5% fibra	158
2,5% de fibra	169
3% fibra	175

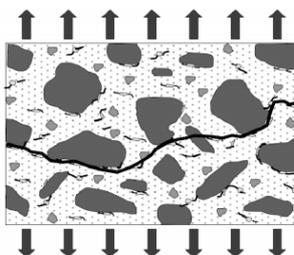
Fonte: Adaptado Zhang, Liu e Wang (2019).

Por sua vez, Yoo, Kim e Kim (2018) investigaram os efeitos da cura térmica (90 °C) e da cura em temperatura ambiente (20 °C) na resistência mecânica de CUADs aos 28 dias. Foi utilizada apenas um tipo de matriz cimentícia, com relação $a/ag = 0,20$, produzida com cimento, sílica ativa, agregado miúdo, fibra de aço e aditivo super plastificante. Alguns dos moldes confeccionados foram curados a temperatura ambiente, enquanto outros foram submetidos a três dias de cura térmica e vinte e cinco dias de cura ambiente. Os resultados de resistência à compressão mostraram que os corpos de prova mantidos em temperatura ambiente atingiram em média 133,7 MPa, enquanto aqueles que passaram pela cura térmica atingiram em média 157,3 MPa.

2.1.4.2 Resistência à tração

A teoria de falhas de Griffith² afirma que eventuais falhas submetidas a um carregamento, tendem a concentrar altos valores de tensões em suas pontas. Dessa forma, mesmo que a tensão ao qual o material se encontra submetido seja baixa, há chances de ocorrer microfissuras localizadas. A situação mais crítica ocorre quando a orientação dessa fissura é normal à direção do carregamento aplicado. Esse é o caso do concreto submetido à tração (Figura 2), que tem a propagação das fissuras no sentido transversal ao da tensão principal, fazendo com que a peça se rompa rapidamente pela interconexão entre as microfissuras (NEVILLE, 2013; ANDRADE; TUTIKIAN, 2011).

Figura 2 – Microestrutura do concreto submetido a tração.



Fonte: Hanai (2005 *apud* ANDRADE; TUTIKIAN, 2011).

Vale salientar que a propagação de uma fissura na pasta de cimento pode ser bloqueada por um “obstáculo”, como um grão de cimento não hidratado, um grande poro ou ainda um material mais dúctil que exige uma grande quantidade de energia para ser fissurado. No caso dos concretos de ultra-alto desempenho são utilizadas as fibras de aço que, além de melhorar a resistência à tração, também proporcionam maior ductilidade ao material (NEVILLE, 2013; TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Behloul (1996, *apud* VANDERLEI, 2004) realizou ensaios de resistência à tração em CUADs utilizando diferentes volumes de fibra. Os espécimes que não continham fibra apresentaram comportamento frágil no momento da ruptura, enquanto todos aqueles que continham fibra apresentaram comportamento dúctil. O

² Alan Arnold Griffith (1893-1963) – foi um engenheiro inglês que estudou a natureza das tensões e das falhas em matérias metálicas.

autor concluiu que as fibras dão uma maior ductilidade ao material após o início da fissuração e que, se utilizadas em valores de 4%, podem até duplicar a resistência à tração do concreto.

2.1.4.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é definido como a relação entre a tensão e deformação do concreto podendo este ser do tipo estático ou dinâmico. Em se tratando de concretos convencionais, existem diversas fórmulas que correlacionam a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Porém, segundo AFGC (2013), isso não se aplica aos CUADs, sendo necessário o ensaio experimental para cada tipo de mistura. Em caso de não haver esse valor na etapa de projeto, se sugere adotar o módulo de elasticidade igual a 50 GPa.

O módulo de elasticidade e o volume de agregados dentro da mistura, influenciam no módulo de elasticidade final dos concretos (NEVILLE, 2013). Ma *et al.* (2004) compararam CUADs com e sem agregados graúdos e concluíram que não houve diferença de resistência à compressão entre eles, porém aqueles que continham agregados graúdos apresentaram maior módulo de elasticidade e menor capacidade de deformação.

Yoo *et al.* (2014) investigaram as propriedades mecânicas e o módulo de elasticidade de CUADs reforçados com diferentes volumes de fibra de aço (1%, 2%, 3% e 4%). Os concretos foram produzidos com $a/ag = 0,20$, cimento, sílica ativa, areia fina, superplastificante e fibras com comprimento de 13 mm e diâmetro 0,2 mm, sendo curados dois dias a temperatura ambiente e três dias a 90 °C antes dos ensaios. Os resultados de módulo de elasticidade em média foram de 50,7; 50,9; 52,7 e 48,4 GPa, para 1%,2%,3% e 4% de fibra, respectivamente.

Pourbaba *et al.* (2018) também analisaram o módulo de elasticidade de CUADs utilizando diferentes volumes de fibra de aço (0%,1%,2%,3%,4%,5% e 6%). Os concretos eram produzidos com $a/ag = 0,19$, cimento, sílica ativa, areia fina, pó de quartzo, fibras com comprimento de 13 mm e diâmetro 0,16 mm, sendo curados em solução de água e cal por 28 dias, antes da realização dos ensaios. Os resultados de módulo de elasticidade em média foram de 42,34; 42,80; 43,23; 44,72;

45,78; 46,21; 47,00 GPa para 0%,1%,2%,3%,4%, 5% e 6% de fibra, respectivamente.

2.2 Retração autógena

A retração é caracterizada pela deformação da pasta de cimento causada pela saída de água, hidratação do cimento e/ou pela carbonatação. Esse fenômeno gera variações de volume no concreto, fazendo com que a peça encolha. Em estruturas, tal deslocamento é usualmente restringido ou parcialmente restringido, induzindo ao aparecimento de tensões nas peças. O maior risco é quando essas tensões induzidas são de tração, visto que o concreto possui baixa resistência à tração podendo, nesse caso, vir a fissurar. Sabe-se que as fissuras devem ser evitadas, pois afetam a durabilidade e integridade estrutural do concreto, além de serem esteticamente indesejáveis (NEVILLE, 2013).

As deformações citadas anteriormente são causadas pela ação conjunta de quatro tipos de retrações, sendo elas retração plástica, hidráulica ou por secagem, por carbonatação e autógena. A retração plástica ocorre com a mistura ainda no estado plástico e é causada pela perda de água por evaporação na superfície do concreto. A retração hidráulica ocorre no estado endurecido e é associada à perda de umidade para o ambiente quando o concreto está exposto a um ambiente de umidade abaixo da condição de saturação. Já a retração por carbonatação é produto de uma reação química entre o CO_2 (dióxido de carbono) do ar e o Ca(OH)_2 formado pela hidratação do cimento. Estes compostos, ao reagirem, formam água que, quando evaporada resulta em retração hidráulica (DINIZ; FERNANDES; KUPERMAN, 2011; ISAIA, 2011).

A retração autógena, por sua vez, recebe este nome por acontecer independente das condições externas, sendo um fenômeno isotrópico e que se apresenta em qualquer gradiente de umidade. Sua ocorrência está associada à soma de dois efeitos interdependentes, chamados de retração química e de auto-dessecação. No primeiro caso, a contração resulta das reações químicas entre o cimento e a água, dado que os produtos da hidratação apresentam volume menor que a soma dos volumes iniciais dos dois materiais. Já a retração por auto-

dessecação ocorre devido ao consumo de água pelas reações. Durante o processo de hidratação, a água é consumida dos poros maiores para os poros menores, diminuindo quantidade de água livre dentro do concreto. Dessa forma, há surgimento de meniscos capilares, cujas tensões superficiais causam o encolhimento da pasta (DINIZ; FERNANDES; KUPERMAN, 2011).

Em concretos convencionais, este fenômeno é considerado pouco expressivo, visto que existe mais água que o necessário para hidratação, ou seja, os poros estão sempre saturados. Todavia, essa não é a mesma realidade dos CUADs, uma vez que estes utilizam uma baixa relação a/ag e uma quantidade elevada de cimento. Assim sendo, há uma escassez de água para hidratação dos grãos, o que gera uma maior taxa de dessecação dos poros e por isso, uma retração autógena mais acentuada (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011; ZHANG; LIU; WANG, 2019). Em números, os concretos convencionais apresentam retração autógena aos 28 dias usualmente menor que 100×10^{-6} m/m, enquanto que nos CUADs, esse valor chega a 700×10^{-6} m/m (SHEN *et al.*, 2018).

Visando mitigar este problema, de modo a evitar o aparecimento de fissuras, algumas abordagens têm sido estudadas entre os pesquisadores da área. Dentre elas, pode-se citar o uso de polímeros superabsorventes, aditivos expansores e agentes redutores de retração. Estes últimos são elementos capazes de reestabelecer a umidade nos poros e combater os efeitos da tensão superficial. Alguns autores também sugerem como solução aumentar o efeito restritivo dentro do concreto através do uso de agregados graúdos, por exemplo, ou na maioria dos casos de CUADs, utilizando fibras de aço (ZHANG; LIU; WANG, 2019; SHEN *et al.*, 2018; WU; SHI; KHAYAT, 2019).

Wu, Shi e Khayat (2019) investigaram o efeito das microfibras de aço na retração autógena de CUADs. Para isso, foram produzidas misturas com diferentes volumes (0%, 1%, 2% e 3%) e tipos de fibra (retas, corrugadas e com ancoragem nas extremidades), sendo as mesmas de comprimento 13 mm e diâmetro de 0,2 mm. Os compósitos, de relação a/ag = 0,18, foram feitos utilizando cimento, sílica ativa, areia natural e aditivo superplastificante, que foi dosado para cada mistura para obter um espalhamento entre 24 e 25 cm no ensaio de *mini-slump flow*. Para

medir a retração autógena, utilizou-se um tubo corrugado de polietileno, de comprimento 340 mm e diâmetro 20 mm, que foi totalmente preenchido com concreto e depois vedado. As variações dos corpos de provas eram então capturadas por sensores tipo *led* e enviadas a um aquisitor de dados, pelo período de 72h após a mistura inicial do material.

Os resultados encontrados pelos supracitados mostraram que a retração autógena aumentou rapidamente nas primeiras 15h, ficando razoavelmente estável no resto do tempo. Além disso, a utilização das fibras reduziu significativamente o encolhimento das misturas. Quando comparados à composição referência (0% de fibra), os concretos com fibras retas em teores de 1%, 2% e 3% obtiveram uma redução na retração autógena de 17%, 50% e 53%, respectivamente, após 16h de ensaio. Com relação ao tipo, para volumes de 2%, as corrugadas e com ancoragens apresentaram melhor desempenho do que as retas (redução da retração em 14% e 25%, respectivamente). Ainda, para este volume, ao final das 72 horas, os valores de retração mínima e máxima observadas foram de 560×10^{-6} m/m (fibras com ancoragem) e de 730×10^{-6} m/m (fibras retas).

Dessa forma, os autores concluíram que o volume e a forma das fibras de aço tiveram um efeito significativo na restrição ao encolhimento dos CUADs, sendo que a utilização de 2% de fibras foi o que demonstrou o melhor resultado. Além disso, a fibra com ganchos nas pontas apresentou melhor eficiência, quando comparada as fibras retas e onduladas.

Zhang, Liu e Wang (2019) também estudaram os efeitos da retração autógena em CUADs, comparando misturas com diferentes volumes de fibras de aço (0%, 1,0%, 1,5% e 2,5%). Os concretos, de $a/ag = 0,18$, foram confeccionados utilizando os mesmos teores de cimento, sílica ativa, cinza volante e superplastificante, porém diminuindo a quantidade de areia conforme aumentava-se o volume de fibra. Para medir o efeito da retração autógena foram utilizados corpos de prova 40 x 60 x 1000 mm, que ficavam sob condições isotérmicas e estavam conectados a sensores LVDT (do inglês *Linear Variable Differential Transformer* ou Transformador Diferencial Variável Linear). Estes, por sua vez, estavam ligados a um aquisitor de dados.

Os resultados encontrados pelos autores evidenciaram que, após 14 dias, a adição das fibras diminuiu a retração autógena do concreto. Quando comparadas com a composição referência (0% de fibra), aquelas que continham 1%, 1,5% e 2,5% de fibra, mitigaram o efeito em 19,8%; 29,2% e 39,1%, respectivamente. Com relação ao valor total de retração, a mistura com 1,5% de fibra, por exemplo, obteve neste período um encolhimento de 842×10^{-6} m/m.

Por fim, os autores puderam concluir que houve um efeito significativo na restrição do encolhimento com a adição das microfibras de aço aos CUADs. Os mesmos acreditam que tal efeito foi resultado da ligação interfacial entre a matriz de cimento e as fibras. Assim, os mesmos desenvolveram um modelo de previsões de retração autógena para CUADs, trabalhando como variáveis o volume e a geometria de fibras de aço.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nessa sessão serão apresentados os materiais e os métodos que foram utilizados no presente trabalho.

3.1 Materiais

Para a confecção dos concretos foram utilizados os seguintes materiais: cimento, areia, água, aditivo e microfibras.

3.1.1 Cimento

Utilizou-se o cimento do tipo CP V – ARI RS. Na Tabela 2 constam as especificações fornecidas pelo fabricante, comparando os resultados com o que prescreve a norma NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 2 – Características do cimento fornecidas pelo fabricante.

Ensaio	NBR 16697	Cimento utilizado
Marca	N/A	Votoran
Massa específica (g/cm ³)	N/A	3,0
Início de pega (min)	≥ 60	234
Fim de pega (min)	≤ 600	271
SO ₃ (%)	≤ 4,5	2,9
MgO (%)	sem restrições	5,8
Perda ao fogo (%)	≤ 6,5	4,1
Resíduo insolúvel (%)	sem restrições	10,8
Resistência - 1 dia (MPa)	≥ 14,0	22,7
Resistência - 3 dias (MPa)	≥ 24,0	32,8
Resistência - 7 dias (MPa)	≥ 34,0	38,0

Fonte: Votoran (2019).

3.1.2 Areia

Utilizou-se areia padrão brasileira conforme determina a norma NBR 7214 (ABNT, 2015). Seu beneficiamento e fornecimento é feito pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT-SP), o qual separa a areia em porções granulométricas, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Frações granulométricas da areia.

Denominação da fração	Material entre as peneiras de abertura nominal (mm)
16	2,4 e 1,2
30	1,2 e 0,6
50	0,6 e 0,3
100	0,3 e 0,15

Fonte: Adaptado NBR 7214 (ABNT, 2015).

3.1.3 Aditivo

O aditivo utilizado foi o superplastificante à base de policarboxilato PowerFlow 4001, da marca MC- Bauchemie. O mesmo tem uma alta eficiência e é recomendado na produção de concretos de alto e ultra-alto desempenho. Na Tabela 4 se encontram algumas informações técnicas que foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 4 - Características do aditivo.

Característica	Resultado
Estado	Líquido
Massa específica (g/cm ³)	1,12
Dosagem recomendada	0,2% a 5,0% sobre a massa de cimento

Fonte: adaptado MC - Bauchemie (2019).

3.1.4 Fibra

Foram utilizadas microfibras de aço retas (Figura 3), que são superficialmente revestidas com uma liga de zinco e cobre e apresentam massa específica igual a 7,95 g/cm³, dimensões de 13 mm × 200 µm (fator de forma (λ) igual a 65, denominação comercial OL 13/.20, fabricante Bekaert/Dramix®).

Figura 3 – Microfibras de aço.



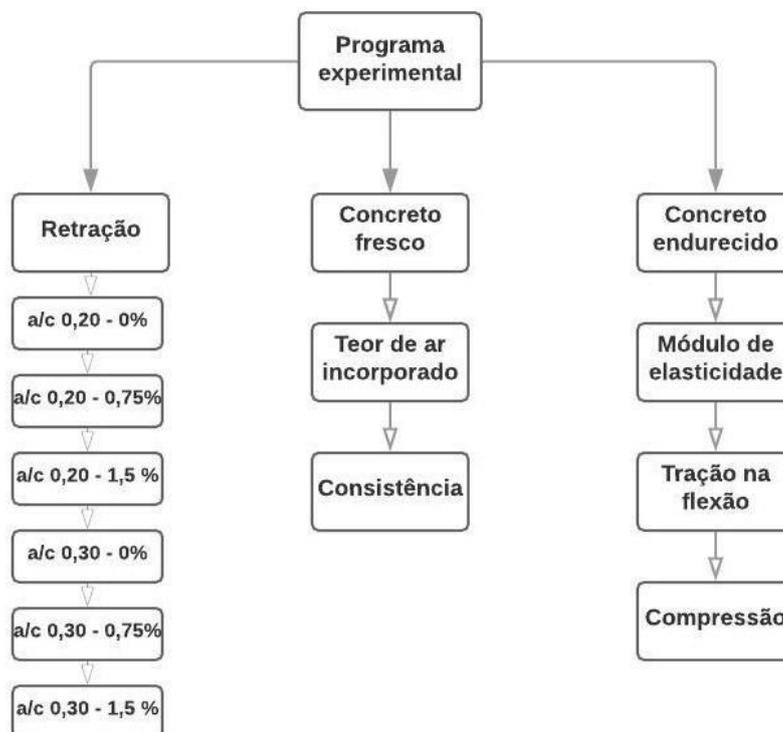
Fonte: a autora (2019).

3.2 Métodos

O presente trabalho buscou avaliar a influência das microfibras de aço na retração autógena de CUADs. Para isso, foram produzidas misturas com diferentes relações a/c (0,20 e 0,30) e diferentes volumes de fibra ($V_f = 0\%$, $V_f = 0,75\%$ e $V_f = 1,5\%$ - percentual em relação ao volume de concreto), totalizando 6 composições avaliadas. Optou-se por variar a a/c e o teor de fibra, pois esses são fatores que influenciam diretamente na retração autógena do concreto.

Para fins de caracterização dos compósitos, foram analisados o índice de consistência e o teor de ar incorporado no estado fresco, enquanto que no estado endurecido avaliaram-se o módulo elástico dinâmico, a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão. O fluxograma apresentado na Figura 4 mostra o detalhamento do programa experimental adotado.

Figura 4 – Fluxograma do programa experimental.



Fonte: a autora (2019).

3.2.1 Dosagem e mistura

Para a dosagem dos agregados miúdos, optou-se por usar uma composição de dois tipos de areia, sendo metade de fração 50 e a outra de fração 100. O quantitativo unitário de areia adotado foi 1,25 maior que a massa de cimento.

Com relação ao melhor teor de aditivo para cada relação a/c, se buscou encontrar um valor que proporcionasse uma trabalhabilidade adequada ao concreto no ensaio de índice de consistência prescrito pela NBR 7215 (ABNT, 2019). Wu, Shi e Khayat (2019) investigaram as propriedades mecânicas e a retração de CUADs que continham diferentes volumes e tipos de fibras. Para isso, um de seus critérios foi variar o teor de aditivo das misturas, de modo que todos os concretos atingissem um espalhamento entre 24 e 25 cm no ensaio de índice de consistência, sem adensamentos.

No presente trabalho, foram realizados testes preliminares com este mesmo tipo de ensaio, onde para atingir uma abertura de aproximadamente 30 cm nas

misturas referência (0% de fibra), utilizou-se um teor de aditivo fixo de 2,8% m.c. para $a/c = 0,20$ e 0,3% m.c. para $a/c = 0,30$.

Assim, como critério de comparação, para cada relação a/c , optou-se por manter sempre a mesma proporção de materiais, com exceção da fibra, que variava. A Tabela 5 apresenta os quantitativos utilizados para produção de um metro cúbico de cada CUAD confeccionado no presente trabalho.

Tabela 5 – Quantitativos para produção de 1m^3 de CUAD.

	Proporção (cimento:areia:água:aditivo)	Volume de fibra (%)	Materiais - massa (kg)				
			Cimento	Areia	Água	Aditivo	Fibra
a/c = 0,20	1: 1,25: 0,20: 2,8%	0	970	1212,6	194	27,2	0
		0,75	970	1212,6	194	27,2	59,7
		1,5	970	1212,6	194	27,2	119,3
a/c = 0,30	1: 1,25: 0,30: 0,3%	0	902	1127,5	270,6	2,7	0
		0,75	902	1127,5	270,6	2,7	59,7
		1,5	902	1127,5	270,6	2,7	119,3

Fonte: a autora (2019).

As misturas foram confeccionadas no LMCC/UFSC (Laboratório de Materiais de Construção Civil), em uma sala climatizada (23 ± 2 °C) e utilizando uma argamassadeira planetária, com uma cuba para capacidade de 5L (Figura 5), conforme indica a NBR 7215 (ABNT, 2019). Para cada tipo de composição foram confeccionados aproximadamente 1,25 L de concreto e a ordem de colocação dos materiais no misturador ligado foi a seguinte: primeiro misturava-se toda a água com o aditivo, a seguir acrescentava-se todo o cimento, depois a areia e por último a fibra, se houvesse.

Todos os CUADs ficaram misturando o mesmo período (16 minutos), sendo que os 5 primeiros minutos foram na velocidade lenta (140 rpm – rotações por minuto) e os outros 9, intercalados com 1 minuto na lenta e 1 minuto na rápida (285 rpm). Quando havia fibra na mistura, adicionava-se a mesma no minuto 14, ou seja, ficava misturando por 2 minutos, antes que equipamento parasse.

Cada composição foi confeccionada duas vezes, sendo a primeira para a reprodução dos ensaios no estado fresco e moldagem dos corpos de prova e a segunda para avaliação da retração.

Figura 5 – Argamassadeira planetária.



Fonte: a autora (2019).

3.2.2 Ensaio de retração autógena

As dimensões do aparato medidor de retração foram baseadas no que determina a NBR 15261 (ABNT, 2005), que estabelece recomendações sobre a variação dimensional de argamassas no estado endurecido. De acordo com a norma, os moldes devem ser feitos de aço ou material não absorvente e com tamanho de 25 x 25 x 285 mm.

No entanto, vale ressaltar que o procedimento para medir retração utilizado no presente trabalho é diferente do que recomenda esta norma. A mesma prescreve desmoldar as barras e medir a variação de comprimento em um pórtico, enquanto no aparato utilizado a barra não é desmoldada e a retração é medida diretamente no molde. Além disso, no ensaio da norma, só é possível fazer as medidas a partir da desmoldagem da barra, ou seja, as primeiras horas de leitura são perdidas, enquanto que no ensaio proposto as leituras são feitas desde o instante inicial.

O equipamento medidor de retração utilizado fica localizado em uma sala climatizada (23 ± 2 °C), sobre uma bancada imóvel. O mesmo, é dotado de 4 câmaras vedadas e separadas entre si, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Aparato medidor de retração.



Fonte: a autora (2019).

Na extremidade de cada molde, existem sensores do tipo LVDT, que são os responsáveis por captar as variações de tamanho das amostras, transmitir a um sistema de aquisição de dados, que é ligado a um computador.

Cada concreto foi acomodado no molde com uma espátula, de modo que todos os espaços fossem preenchidos. As medições tiveram início com a mistura ainda no estado fresco, e os registros foram feitos a cada 50s, por um período de 28 dias. A retração de cada barra foi calculada pela soma da variação dos dois sensores em relação ao comprimento total.

Para que apenas a retração autógena fosse registrada, utilizava-se uma tampa de vidro para vedar o molde.

3.2.3 Ensaio no estado fresco

O concreto fresco foi também submetido a dois ensaios: teor de ar incorporado e determinação do índice de consistência. No primeiro caso, optou-se por esse procedimento para verificar se a inserção da fibra aumentaria ou não a incorporação de ar das misturas, quando comparadas à composição. Sabe-se que o aumento de ar na mistura, significa maior número de vazios no compósito e por isso há uma tendência a redução nas propriedades mecânicas do estado endurecido.

Com relação o ensaio de índice de consistência, foi feito com o intuito de verificar a influência da fibra na trabalhabilidade dos CUADs, propriedade esta

importante para o uso adequado do produto. Para isso, foi comparada o espalhamento das misturas, que continham a mesma relação a/c e mesmo percentual de aditivo, mas com diferentes teores de fibra.

3.2.3.1 Teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado foi feito com base na NBR 13278 (ABNT, 2015), que estipula procedimentos para este ensaio em argamassas. De acordo com a norma, o primeiro passo é calcular a capacidade volumétrica de um recipiente conhecido. Para isso, o mesmo deve ser pesado vazio e posteriormente completamente cheio de água, de modo que a diferença desses valores seja o seu volume. Isto é possível pois a densidade da água é igual a 1.

O segundo passo é calcular a densidade real do material. Uma vez que a massa do recipiente vazio é conhecida, basta calcular a massa de concreto de maneira análoga ao procedimento anterior. No presente trabalho, a mistura fresca foi introduzida de forma contínua e uniforme até completar o vasilhame, em seguida, com uma espátula, foram aplicados 10 golpes ao longo do perímetro e profundidade do CUAD, sendo logo após efetuada a rasura e limpeza do recipiente, que então foi pesado. Com a massa de concreto e o volume do recipiente, se determinou a densidade real da mistura em questão.

Por fim, para a determinação do ar incorporado também foi necessário saber a densidade teórica do concreto. Calculou-se essa propriedade através da soma dos volumes e massas dos materiais utilizados para cada mistura. Assim, o teor de ar incorporado de cada CUAD em porcentagem, foi determinado pela seguinte equação:

$$A = 100 (1 - d / d_t)$$

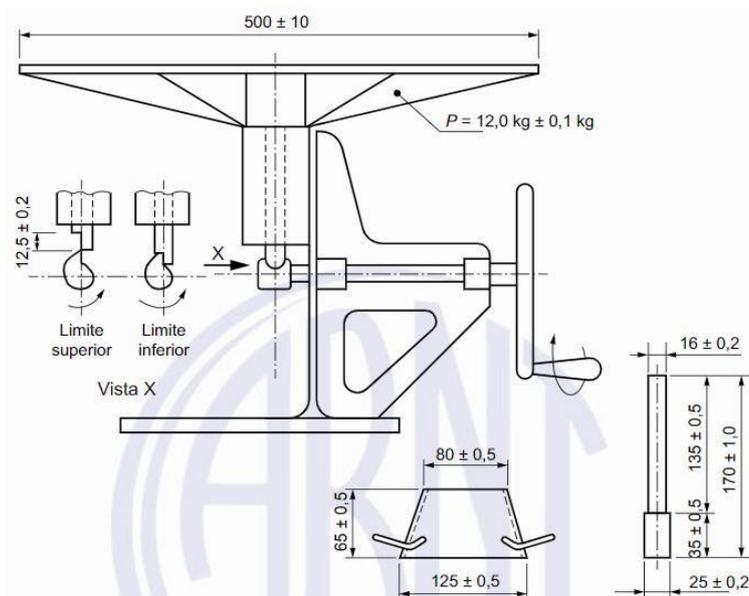
Onde, “A” é o teor de ar incorporado, “d “ é o valor da densidade real da argamassa (g/cm³) e “d_t“ é o valor da densidade teórica da argamassa (g/cm³)

3.2.3.2 Determinação da consistência (*Flow table test*)

A consistência dos concretos foi medida com base na NBR 7215 (ABNT, 2019), usualmente utilizada em argamassas. Segundo a norma, o aparato utilizado consiste em uma mesa horizontal de metal, com uma haste em seu centro conectada a uma manivela, que possibilita um movimento de queda. Ainda, possui um tronco de cone e um soquete, que servem para moldar e golpear a mistura respectivamente. Internacionalmente este ensaio é conhecido como *flow tablet test*. A Figura 7 indica as dimensões do aparelho em milímetros.

No presente trabalho, antes de iniciar o ensaio, a superfície de metal e o tronco de cone foram levemente umedecidos. A seguir, o molde centralizado sobre a mesa foi totalmente preenchido com o concreto fresco de forma contínua e uniforme, sem sofrer adensamentos, sendo erguido verticalmente, de modo que a mistura se espalhasse. A abertura final do concreto foi calculada pela média de duas medidas perpendiculares sobre o espalhamento obtido. Ainda, se averiguou a presença de exsudação, caso houvesse acúmulo de água nas bordas do concreto avaliado.

Figura 7 – Mesa para índice de consistência – Dimensões em mm.



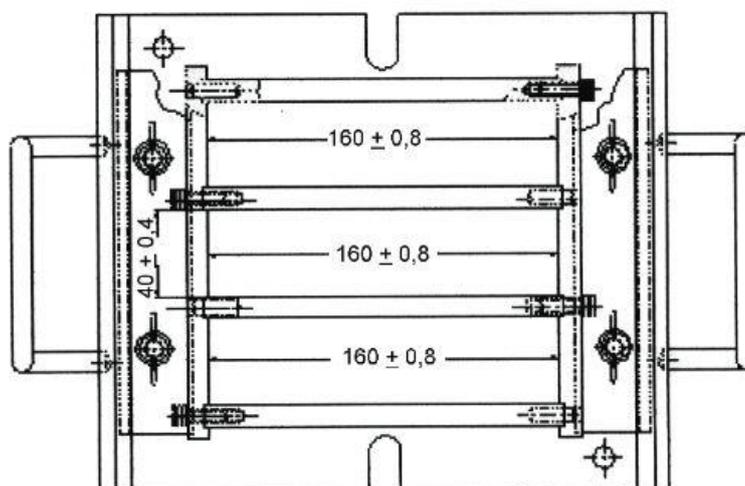
Fonte: NBR 7215 (ABNT, 2019).

3.2.4 Ensaios no estado endurecido

A fim de verificar a influência das microfibras de aço nas propriedades mecânicas dos CUADs, após a parte de ensaios no estado fresco, foram moldados corpos de provas (CPs) para serem testados após 28 dias.

Para os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico e de resistência à tração na flexão, para cada mistura foram confeccionados 3 CPs prismáticos (Figura 8), de tamanho 40x40x160 mm, conforme especifica a NBR 13279 (ABNT, 2015). No procedimento, cada molde foi preenchido em duas camadas consecutivas e de mesma espessura, onde cada uma delas foi submetida a 10 golpes de adensamento. A seguir, o aparato era vedado com uma tampa de vidro, a fim de evitar a saída de água nas primeiras 48h. Após a desmoldagem, os exemplares seguiam para uma câmara úmida ($23 \pm 2^\circ\text{C}$), onde permaneceram até 28 dias de idade.

Figura 8 – Molde prismático.



Fonte: NBR 13279 (ABNT, 2005).

Com relação aos ensaios de resistência à compressão, para cada mistura foram confeccionados 5 CPs cilíndricos, dos quais se utilizou os 3 melhores resultados. Os moldes de acrílico, com diâmetro de 24,5 mm e altura 34,5 mm eram preenchidos em uma única camada e adensados por 30s em uma prensa vibratória,

sendo então vedados por uma tampa e mantidos em câmara úmida ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) até que se completasse o período de 28 dias. Na data do ensaio, os espécimes eram desmoldados e retificados com a ajuda de uma cortadeira metalográfica e um disco de cobre diamantado, ficando com a dimensão final de 24 mm de diâmetro e 24 mm de altura (Figura 9).

Figura 9 – Moldes cilíndricos.



Fonte: a autora (2019).

3.2.4.1 Módulo de elasticidade dinâmico

Os CPS prismáticos foram submetidos ao ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, através do equipamento Sonelastic®, desenvolvido e fabricado pela empresa ATCP Engenharia Física, conforme mostra a Figura 10.

Figura 10 – Equipamento Sonelastic®.



Fonte: a autora (2019).

O aparato consiste de um suporte, dotado de cabos metálicos ajustáveis, aonde as amostras ficam apoiadas. Ainda conta com um pulsador e um transdutor receptor de frequência, responsáveis pela geração e recepção da onda, respectivamente.

As frequências captadas ficam armazenadas em um computador e ao fornecer massa, comprimento, largura, altura e coeficiente de Poisson (adotado 0,2) do exemplar, um *software* calcula o resultado de módulo elástico dinâmico. Para cada mistura, foram ensaiados 3 CPs, e para cada um desses foram feitas 3 medições, obtendo-se como valor final a média.

3.2.4.2 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão a três pontos (Figura 11), foi baseado na norma NBR 13279 (ABNT, 2005). O procedimento foi feito centralizando uma carga na face superior do corpo de prova prismático, que ficava sustentado sobre dois apoios distantes entre si em 10 cm. A seguir, a prensa (Instron, modelo 5569), aplicava um carregamento de 50 N/s, utilizando uma célula de carga de 50 kN.

Figura 11 – Montagem do ensaio de tração na flexão.



Fonte: a autora (2019).

O cálculo da resistência à tração foi feito da seguinte forma:

$$Rf = \frac{1,5 \times Ff \times L}{b \times h^2}$$

Onde, “Rf” é a resistência à tração na flexão (MPa),” Ff” é a carga máxima aplicada (N),” L” é a distância entre os apoios (mm), “b” é largura do corpo de prova (mm) e “h” a altura (mm) do CP.

3.2.4.3 Resistência à compressão

A resistência à compressão dos concretos foi determinada utilizando os CPs cilíndricos citados anteriormente e através do que prescreve a NBR 5739 (ABNT, 2018). No ensaio, cada molde foi centralizado entre os pratos da prensa universal Shimadzu com capacidade de 20000 kN (Figura 12), onde foi submetido a um carregamento contínuo de 0,45 MPa/s até que houvesse a ruptura.

Figura 12 - Prensa Universal Shimadzu.



Fonte: a autora (2019).

O cálculo de resistência a compressão foi feito o da seguinte forma:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2}$$

Onde, “ f_c ” é a resistência a compressão (MPa), “ F ” é a carga máxima alcançada (N) e “ D ” é o diâmetro do corpo de prova (mm). A norma estabelece também, que para CPs com relação h/d (altura/diâmetro) menor que 1,94, a força “ F ” deve ser multiplicada por um fator de correção tabelado. Para o presente trabalho, a relação h/d utilizada foi 1,, havendo nesse caso a multiplicação da força máxima aplicada por 0,86.

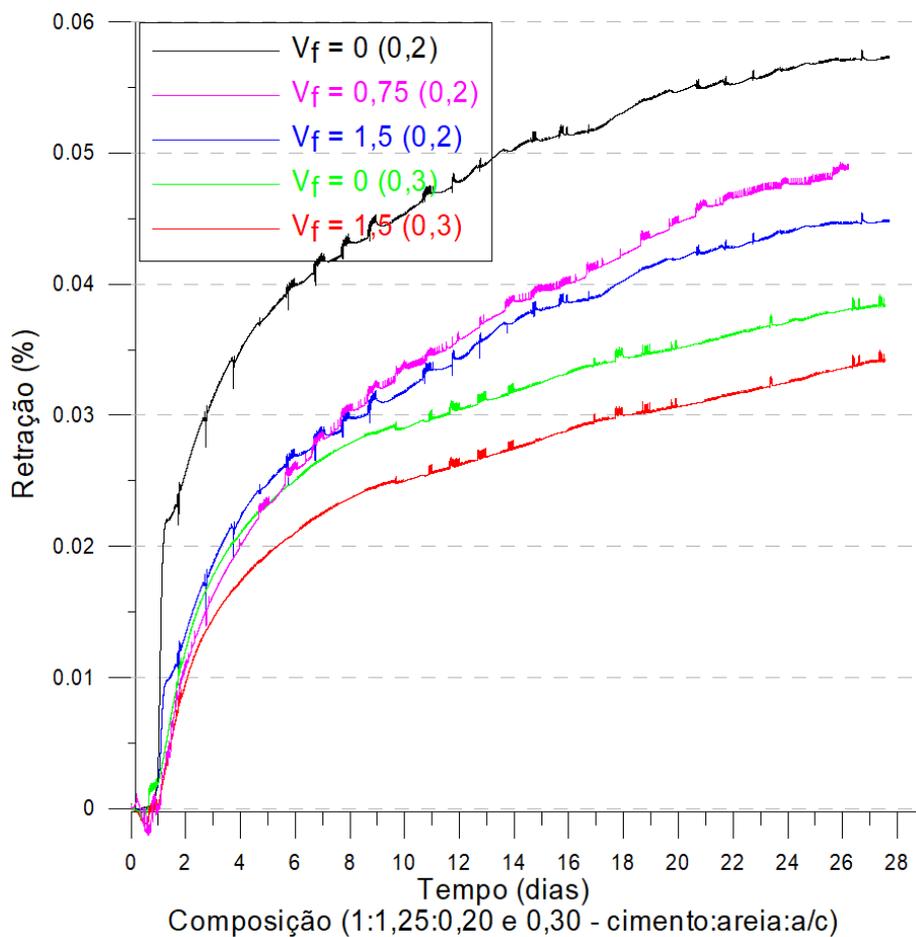
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Retração autógena

Os resultados médios da retração autógena dos concretos, em função do efeito da concentração das fibras e da relação a/c estão apresentados na Figura 13 e na Tabela 6. Pode-se constatar que a adição das microfibras reduziu a retração. Tal fato, provavelmente ocorreu devido à ação restritiva das microfibras dentro do concreto, que ao aderir a pasta de cimento, auxiliou na mitigação do encolhimento. Aos 28 dias, considerando a relação a/c = 0,20 obteve-se uma retração de 572×10^{-6} m/m, 489×10^{-6} m/m, e 448×10^{-6} m/m para $V_f = 0\%$, 0,75% e 1,5%, respectivamente. Ou seja, as misturas $V_f = 0,75\%$ e $V_f = 1,5\%$ reduziram a retração em 14,6% e 21,7%, respectivamente, em relação ao $V_f = 0\%$. Para a/c = 0,30, a retração autógena verificada foi de 384×10^{-6} m/m e 342×10^{-6} m/m para $V_f = 0\%$ e 1,5%, respectivamente. Neste caso, o concreto $V_f = 1,5\%$ apresentou uma retração 10,6% menor do que a referência.

Para a composição com $V_f = 0,75\%$ (a/c = 0,3) ocorreu uma variação extraordinária, e por isso não foi considerada. Em verificação estatística realizada por análise da variância (ANOVA), foi observado o efeito significativo da adição das microfibras ($p = 0,0399$ – para confiabilidade de 95%) na retração autógena dos concretos.

Figura 13 – Retração autógena das misturas.



Fonte: a autora (2019).

Tabela 6 – Resultados da retração autógena média (aos 28 dias).

Mistura	Retração ($\times 10^{-6}$ m/m)	DP ($\times 10^{-6}$ m/m)	CV (%)
0,20 - 0%	572	18,7	3,3
0,20 - 0,75%	489	26,5	5,4
0,20 - 1,5%	448	39,3	8,8
0,30 - 0%	384	5,1	1,3
0,30 - 1,5%	342	20,1	5,9

Fonte: a autora (2019).

Comparando as duas relações a/c, pode-se notar que as misturas a/c = 0,20 apresentaram um valor de retração maior do que a/c = 0,30, visto a menor quantidade de água disponível para hidratação, o que faz aumentar a

autodessecação dos poros. Além disso, o efeito da microfibras como agente mitigador da retração autógena foi maior para $a/c = 0,20$, dado que para $V_f = 1,5\%$ a redução da retração foi de aproximadamente 22%, enquanto que para $a/c = 0,30$ esse valor foi de 11%, comparadas com as respectivas referências.

Wu, Shi e Khayat (2019) verificaram que a adição de fibras de aço retas diminuiu significativamente o efeito da retração autógena em CUADs de $a/ag = 0,18$, confeccionados com cimento, sílica ativa, areia natural e aditivo superplastificante. Quando comparados à composição referência, os concretos com $V_f = 1\%$, 2% e 3% obtiveram uma redução na retração autógena de 17%, 50% e 53%, respectivamente, sendo que a mistura com $V_f = 2\%$ retraiu 730×10^{-6} m/m nas primeiras 72h. Para Zhang, Liu e Wang (2019), a pesquisa realizada comprovou o mesmo efeito. Os concretos foram confeccionados com $a/ag = 0,18$, cimento, sílica ativa, cinza volante e aditivo superplastificante. As fibras de aço, em proporções de $V_f = 1\%$, $1,5\%$ e $2,5\%$, mitigaram o efeito do encolhimento em 19,8%; 29,2% e 39,1%, nesta ordem, onde a mistura com $V_f = 1,5\%$ retraiu 842×10^{-6} m/m após 14 dias de ensaio.

Por fim, pode-se observar o efeito significativo e benéfico do emprego de microfibras de aço para mitigar os efeitos da retração em CUADs, reduzindo a probabilidade de ocorrência de microfissuras. Dessa forma, pode-se inferir que este efeito contribui para o desenvolvimento de concretos mais eficientes e duráveis.

4.2 Estado fresco

4.2.1 Teor de ar incorporado e espalhamento

As seis misturas foram confeccionadas de acordo com os métodos descritos anteriormente, sendo possível verificar o aspecto de algumas delas na Figura 14. Os resultados de percentual de ar incorporado e de espalhamento na mesa de índice de consistência estão apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada**. O cálculo completo do teor de ar incorporado pode ser verificado no Apêndice A.

Figura 14 – Concretos no estado fresco



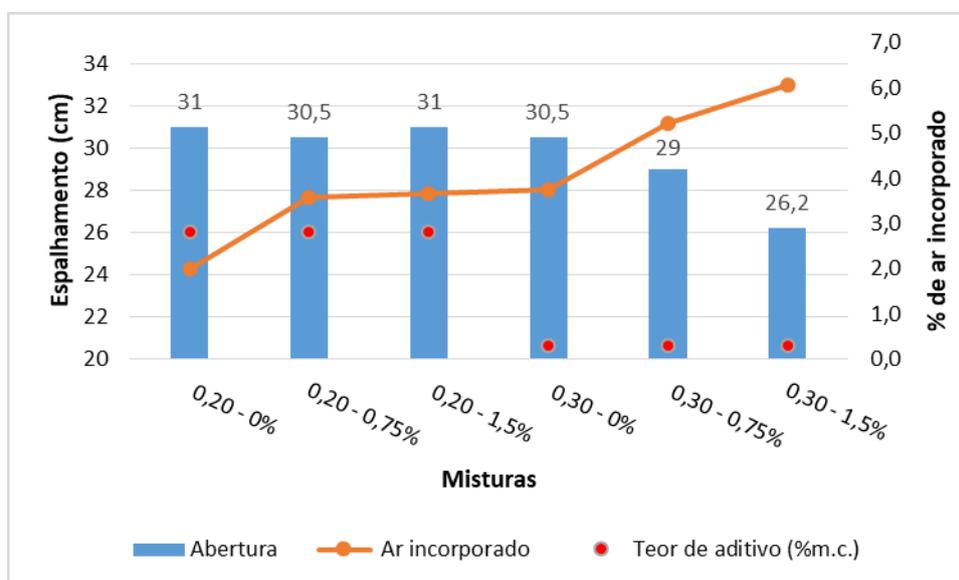
(a)

(b)

(a) $a/c = 0,20 - v_f = 0,75\%$; **(b)** $a/c = 0,30 - v_f = 1,5\%$;

Fonte: autoria própria (2019).

Figura 15 - Teor de ar incorporado e abertura na mesa de índice de consistência.



Fonte: a autora (2019).

Com relação ao percentual de ar incorporado, percebe-se que há um aumento nesse valor conforme se incrementa o volume de fibras, para os dois tipos de concretos confeccionados. Nos CUADs de relação $a/c = 0,20$, os resultados

foram de 2,0%, 3,56% e 3,66% para $V_f = 0\%$, 0,75% e 1,5%, respectivamente. Por sua vez, para $a/c = 0,30$, esses valores foram de 3,75%, 5,21% e 6,05% para $V_f = 0\%$, 0,75% e 1,5%, respectivamente.

Ao comparar as duas relações a/c , pode-se verificar que nas misturas $a/c = 0,20$, após a inserção de fibras a incorporação de ar quase não se alterou, independentemente do teor utilizado. Já as misturas $a/c = 0,30$ tiveram este valor acrescido conforme se aumentou a quantidade de fibras. Ainda se percebe que, no geral, as misturas de relação $a/c = 0,30$ incorporaram mais ar do que aquelas de $a/c = 0,20$.

Para comparação no ensaio de espalhamento, as misturas de mesma relação a/c foram dosadas com o mesmo percentual de aditivo (2,8% m.c. para $a/c = 0,20$, e 0,3% m.c. para $a/c = 0,30$). Os resultados de índice de consistência mostraram que nos concretos de relação $a/c = 0,20$ houve pouca ou nenhuma variação no valor de espalhamento (31, 30,5 e 31 cm para $V_f = 0\%$, 0,75% e 1,5%, respectivamente), indicando que não houve perda de trabalhabilidade com a inserção das fibras. Contudo, naqueles de relação $a/c = 0,30$ essa alteração é mais expressiva (30,5, 29 e 26,2 cm para $V_f = 0\%$, 0,75% e 1,5%, respectivamente), sugerindo que, neste caso, houve perda de trabalhabilidade com a inserção das microfibras. Diante de tais resultados, pode-se inferir que para $a/c = 0,20$ a tendência é que o concreto permaneça com a mesma trabalhabilidade com a inserção de microfibras, enquanto que para $a/c = 0,30$ a tendência é que com a inserção de microfibras haja uma diminuição no espalhamento da mistura.

Do ponto de vista prático, as misturas de relação $a/c = 0,20$ se apresentaram mais viscosas (demandaram maior tempo para atingir a abertura final) do que as de relação $a/c = 0,30$. Isso provavelmente ocorreu devido ao menor volume de água e maior quantidade de cimento, resultando em menor quantidade de água livre para lubrificar a mistura.

Ainda, em nenhum dos compósitos, observou-se a presença de exsudação (acúmulo de água nas bordas do concreto). Esse resultado já era esperado pela grande quantidade de cimento da mistura, dado que pela alta superfície específica, o mesmo é capaz de reter muita água.

4.3 Estado endurecido

Os resultados de módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração na flexão e resistência à compressão estão apresentados na Tabela 7. Para efeito de análise, se utilizou como resultado a média dos valores. Os números individuais estão expostos no apêndice B.

Tabela 7 – Resultados de ensaios no estado endurecido.

Misturas		Módulo de elasticidade			Tração na flexão			Compressão		
		Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
a/c = 0,2	0	47,4	0,0	0,0	13,8	0,7	5,1	106,8	7,2	6,7
	0,75	47,3	0,4	0,9	10,2	1,0	9,8	109,2	1,9	1,8
	1,5	46,8	0,2	0,4	20,3	0,9	4,4	115,7	2,2	1,9
a/c = 0,3	0	35,9	1,7	4,7	10,8	1,7	15,7	68,3	3,9	5,7
	0,75	36,2	0,4	1,0	14,3	1,7	11,9	70,8	1,8	2,6
	1,5	37,3	0,4	1,1	13,3	0,6	4,5	84,3	2,2	2,6

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação;

Fonte: a autora (2019).

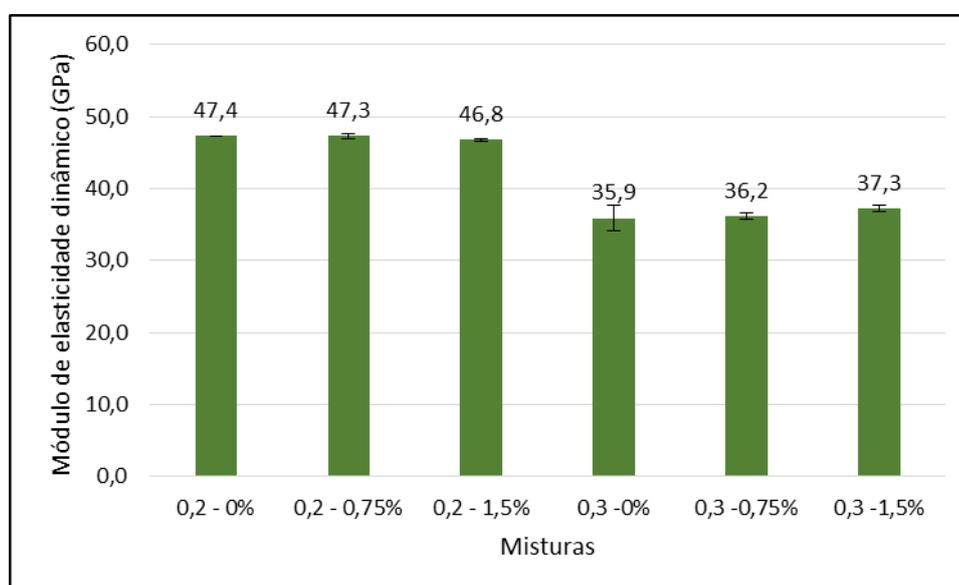
4.3.1 Módulo de elasticidade dinâmico

A Figura 16 mostra graficamente os resultados de módulo de elasticidade dinâmico.

Com relação a este parâmetro, as misturas de relação a/c = 0,20 apresentaram resultados maiores do que as de relação a/c = 0,30. Ao fazer uma análise individual, percebe-se que nas misturas de relação a/c = 0,20 não houve uma mudança significativa do módulo de elasticidade ao inserir as microfibras (diminuição em relação à referência de 0,2% para $V_f = 0,75\%$ e 1,2% para $V_f = 1,5\%$). O mesmo se repete para as misturas de relação a/c = 0,30, onde há um crescimento em relação à referência de 0,8% para $V_f = 0,75\%$ e 3,9% para $V_f = 1,5\%$. Estes resultados vão de acordo com os estudos de Yoo *et al.* (2014), onde a variação de V_f

= 1% para $V_f = 2\%$, aumentou o módulo em apenas 0,4%. O mesmo é evidenciado na pesquisa realizada por Pourbaba *et al.* (2018), visto que comparando a mistura $V_f = 0\%$, com aquelas contendo $V_f = 1\%$ e $V_f = 2\%$, o módulo aumentou 1,1% e 2,1%. Para estes, o CUAD que apresentou a maior diferença foi o confeccionado com $V_f = 6\%$, com um módulo de elasticidade 10% acima da referência. Estes resultados mostram apenas uma tendência, pois as diferenças são pequenas e não significativas.

Figura 16 – Módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: a autora (2019).

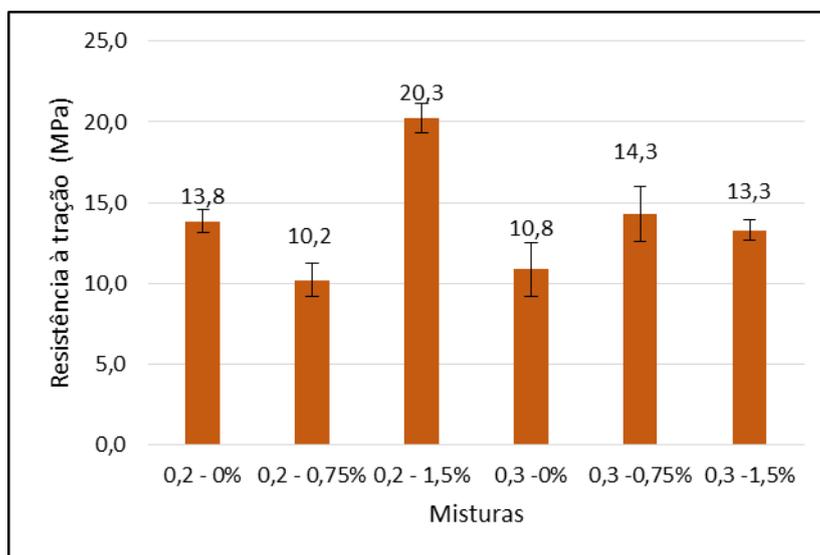
4.3.2 Resistência à tração na flexão

A Figura 17 apresenta graficamente os resultados de resistência à tração na flexão.

As duas relações a/c tiveram comportamentos diferentes à flexão, quando da incorporação das microfibras nas misturas. Para a relação a/c = 0,20, a mistura com $V_f = 0,75\%$ apresentou uma redução de resistência de 26% em comparação à referência, indo contra a tendência observada nos outros compósitos. Para a/c = 0,20 e $V_f = 1,5\%$, houve um aumento de 47,1% em relação a $V_f = 0\%$. Para as misturas de a/c = 0,30, o incremento de resistência foi de 32,4% e 23,1% para $V_f =$

0,75% e $V_f = 1,5\%$, respectivamente. Tal comportamento era o esperado, visto que a inserção de fibras no concreto ajuda a combater a propagação das microfissuras, aumentando a sua capacidade resistente (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 17 – Resultados de resistência à tração na flexão.



Fonte: a autora (2019).

Vale ressaltar ainda, que a ruptura das misturas contendo as microfibras não foram frágeis como as referências, visto que as microfibras eram capazes de manter a resistência após a ruptura (tenacidade), como pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 – Ruptura dos CPs no ensaio de tração.

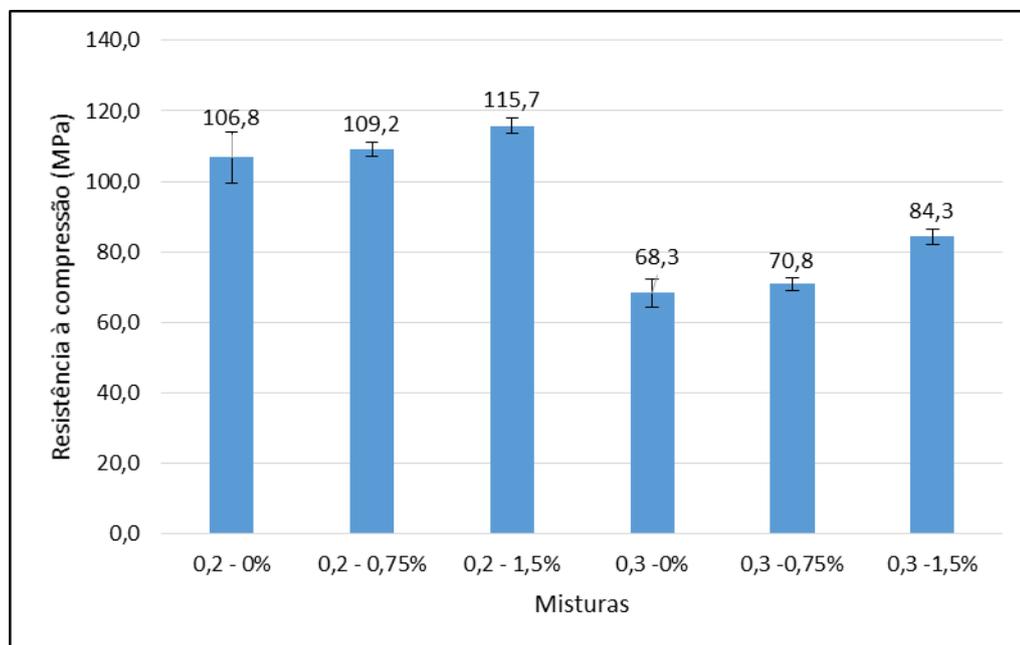


Fonte: a autora (2019).

4.3.3 Resistência à compressão

A Figura 19 apresenta os resultados de resistência à compressão.

Figura 19 – Resistências à compressão.



Fonte: a autora (2019).

De maneira geral, a inserção das microfibras contribuiu para o aumento de resistência à compressão dos concretos. Para a relação $a/c = 0,20$, os compósitos $V_f = 0,75\%$ e $V_f = 1,5\%$ obtiveram um desempenho 2,2% e 8,3% maior que a referência. Para a relação $a/c = 0,30$, esse aumento em comparação a $V_f = 0\%$, foi de 3,7% e 23,4% para $V_f = 0,75\%$ e $V_f = 1,5\%$ respectivamente. Esses valores se devem ao maior efeito restritivo à propagação de microfissuras proporcionado pelas microfibras, o que aprimora a força máxima suportada (WU; SHI, KHAYAT, 2019).

O desempenho observado no presente trabalho vai ao encontro com estudos realizados. Na pesquisa realizada por Wu, Shi e Khayat (2019), comparados à referência ($V_f = 0\%$), os CUADs produzidos com fibras de aço obtiveram um aumento de resistência a compressão de 8,2%, 23,3% e 32,2% para $V_f = 1\%$, 2% e 3%, respectivamente. Zhang, Liu e Wang (2019) também observaram tal comportamento, utilizando fibras de aço em CUADs. As misturas produzidas com $V_f = 1\%$, 1,5%, 2,5% e 3% obtiveram ganhos de resistência à compressão de 12,3%, 21,5%, 30,0% e 34,6%, quando comparados à referência.

Ainda, ao comparar os resultados, percebe-se que $a/c = 0,20$ apresenta desempenho superior. Tal fato já era esperado, visto que essa composição tende a apresentar menor volume de poros internos e conseqüentemente alcança maior resistência mecânica.

5 CONCLUSÕES

Este tópico apresenta as principais considerações levantadas através dos resultados obtidos no presente trabalho. Além disso, serão feitas algumas sugestões para trabalhos futuros, de modo a fomentar o estudo do tema abordado.

5.1 Considerações finais

Com relação ao estado fresco, a inserção das microfibras causou um aumento no teor de ar incorporado, sendo esse valor mais pronunciado para os concretos com $a/c = 0,30$ (incorporação de até 6% para $V_f = 1,5\%$, quando comparado a $V_f = 0\%$). No que diz respeito ao índice de consistência, verificou-se que todas as misturas com $a/c = 0,20$ mantiveram praticamente o mesmo espalhamento, enquanto nos concretos $a/c = 0,30$ houve perda de trabalhabilidade naqueles que continham microfibras. Dessa forma, devido aos resultados divergentes, pode-se concluir que não há um comportamento genérico quanto ao espalhamento.

Para o estado endurecido, não houve uma variação significativa no módulo de elasticidade dinâmico das misturas após a inserção das microfibras. Para $a/c = 0,20$, os concretos com $V_f = 0,75\%$ e $V_f = 1,5\%$ tiveram uma redução no módulo de elasticidade de 0,2% e 0,8%, quando comparados à $V_f = 0\%$. Já para $a/c = 0,30$, se obteve ganho de 0,8% para $V_f = 0,75\%$ e 3,9% para $V_f = 1,5\%$. Quanto a resistência à tração na flexão, verificou-se que a inserção das microfibras melhorou o desempenho dos concretos com $V_f = 1,5\%$. Para $a/c = 0,20$, houve ganho de 47%, e para $a/c = 0,30$ esse crescimento foi de 23%. As misturas com $V_f = 0,75\%$ no entanto, apresentaram comportamentos divergentes, visto que para $a/c = 0,20$ houve perda de resistência de 26%, enquanto que para $a/c = 0,30$ houve um aumento de 32%. Na resistência à compressão, houve aumento de desempenho com a incorporação das microfibras. Para $a/c = 0,20$ esse crescimento foi de 2% e 8% para $V_f = 0,75\%$ e $V_f = 1,5\%$, ao passo que para $a/c = 0,30$, o incremento de resistência foi de 4 % e 23% para $V_f = 0,75\%$ e $V_f = 1,5\%$, respectivamente.

Quanto a retração autógena, verificou-se que as misturas contendo microfibras de aço retraíram menos. Para $a/c = 0,20$, os concretos com $V_f = 0,75\%$ e $V_f = 1,5\%$ retraíram 15% e 22% menos do que à referência, respectivamente, enquanto que para $a/c = 0,30$, essa redução foi de 11% para $V_f = 1,5\%$.

Dessa forma, com os resultados apresentados, pode-se concluir que a incorporação de volumes de 0,75% e 1,5% de microfibras de aço em CUADs, diminui a retração autógena. Além disso, com esses mesmos teores, não há alteração significativa no módulo de elasticidade dinâmico, e há incremento na resistência à compressão. Considerando a resistência à tração na flexão, houve aumento de desempenho nos concretos com volume de 1,5% de microfibras.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Maiores teores de fibras: verificar o desempenho do CUAD na trabalhabilidade, resistência mecânica e na retração autógena utilizando maiores teores de microfibras de aço;
- Utilização de adições minerais: verificar os efeitos da microfibra de aço na retração autógena de CUADs que utilizam diferentes adições minerais, como metacaulim e sílica ativa;

6 REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndrico.** Rio de Janeiro/ RJ, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação.** Rio de Janeiro/ RJ, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro/ RJ, 2019.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro/ RJ, 2005.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro/ RJ, 2005.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15261: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear).** Rio de Janeiro/ RJ, 2005.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15530: Fibras de aço para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro/ RJ, 2007.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro/ RJ, 2018.

AFGC. ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL. **Ultra high performance fibre-reinforced concretes** - Interim recommendations. Paris: AFGC, 98 p. 2002.

_____. ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL. **Ultra high performance fiber-reinforced concretes** - Recommendations. Paris: AFGC, 358 p. 2013.

ANDRADE, J.J.O; TUTIKIAM, B.F. Resistência mecânica do concreto. In: ISAIA, G. C. (Org.) **Concreto: Ciência e Tecnologia** ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 616–651, 2011.

AZMEE, N.M.; SHAFIQ, N. **Ultra-high performance concrete: from fundamental to applications**. Case studies in construction materials, v. 9, 2018.

DINIZ, J.Z.F.; FERNANDES, J.F.; KUPERMAN, S.C. Retração e Fluência. In: ISAIA, G. C. (Org.) **Concreto: Ciência e Tecnologia** ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 674–703, 2011.

FIGUEIREDO, A.D. Concreto com Fibras. In: ISAIA, G. C. (Org.) **Concreto: Ciência e Tecnologia** ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 1328–1365. 2011.

ISAIA, G. C. A água no Concreto. In: ISAIA, G. C. (Org.) **Concreto: Ciência e Tecnologia** ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 312–346, 2011.

KANG, S.H; JEONG, Y.; TAN, K.H.; MOON, J. High-volume use of limestone in ultra-high performance fiber-reinforced concrete for reducing cement content and autogenous shrinkage. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 292-305, 2019.

LEE, Y.; KANG, S.-T.; KIM, J.-K. Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 10, p. 2030-2041, 2010.

MATOS, P.R.; SAKATA, R.D.; PRUDÊNCIO Jr., L.R. Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v.225, p. 941-955, 2019.

MELO NETO, ANTONIO A. DE; HELENE, PAULO R. L. **Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos**. São Paulo: IBRACON, 2002.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**, 2ª edição, Porto Alegre-RS, Editora Bookman, 2013.

NUNES, N. L.; FIGUEIREDO, A. D. Retração do concreto de cimento Portland. **Boletim Técnico, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 59p., São Paulo, 2007.

POURBABA, M. *et al.* Effect of age on the compressive strength of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 402-410, 2018.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and concrete research**, v. 25, n. 7, p. 1501-1511, 1995.

RUSSELL, H. G.; GRAYBEAL, B. A. **Ultra-high performance concrete: A state-of-the-art**. Report for the Bridge Community FHWA-HRT-13-060. McLean: Office of Infrastructure Research & Development. Federal Highway Administration, 2013, 171 p.

SHEN, P.; LU, L.; HE, Y.; RAO, M.; FU, Z.; WANG, F.; HU, S. Experimental investigation on the autogenous shrinkage of steam cured ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v.162, p. 512-522, 2018.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, G. C. (Org.) **Concreto: Ciência e Tecnologia** ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 1283–1326, 2011.

VANDAMME, M. **The Nanogranular Origin of Concrete Creep: A Nanoindentation Investigation of Microstructure and Fundamental Properties of Calcium-Silicate-Hydrates**. 2008. 366 p. Thesis (Ph.D. in the field of Structures and Materials), Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2008.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. 168 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

WARNOCK, R. **Short-term and time-dependent flexural behaviour of steel fibre-reinforced reactive powder concrete**. 2005. 201 p. Thesis (Ph.D.), School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Sidney, 2005.

WU, Z.; SHI, C.; KHAYAT, K.H. Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape. **Composites: Part B**, v. 174, n. 107021, 2019.

YANG, R.; YU, R.; SHUI, Z.; GUO, C.; WU, S.; GAO, X.; PENG, S. The physical and chemical impact of manufactured sand as a partial replacement material in Ultra-High Performance Concrete (UHPC). **Cement and Concrete Composites**, v. 99, p. 203-213, 2019.

YOO, D.Y.; SHIN, H.O.; YANG, J.M.; YOON, Y.S. Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers. **Composites: Part B**, v. 58, p. 122-133, 2014.

YOO, D.Y.; KIM, S.; KIM, M.J. Comparative shrinkage behavior of ultra-high-performance fiber reinforced concrete under ambient and heat curing conditions. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 406-419, 2018.

YOO, D.Y.; BANTHIA, N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v.73, p. 267-280, 2016.

ZHANG, X.; LIU, Z.; WANG, F. Autogenous shrinkage behavior of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v.226, p. 459-468, 2019.

7 APÊNDICES

APÊNDICE A

Cálculo da densidade teórica das misturas.

Material	Massa específica (g/cm ³)	a/c = 0,2 – (g)			a/c = 0,3 – (g)		
		0%	0,75%	1,50%	0%	0,75%	1,50%
Cimento	3	1			1		
Areia	2,64	1,25			1,25		
Água	1	0,2			0,3		
Aditivo	1,12	0,028			0,003		
Fibra	7,95	0,00	0,06	0,12	0,00	0,07	0,13
Volume aparente (cm³)		1,03	1,04	1,05	1,11	1,12	1,13
Massa (g)		2,48	2,54	2,60	2,55	2,62	2,69
Densidade teórica (g/cm³)		2,40	2,44	2,48	2,30	2,34	2,38

Cálculo do teor de ar incorporado das misturas.

Mistura	Massa (g)	Volume do recipiente (cm ³)	Densidade real (g/cm ³)	Densidade teórica (g/cm ³)	Ar incorporado
0,20 - 0%	938,6	398,8	2,35	2,40	2,00%
0,20 - 0,75%	939,5		2,36	2,44	3,56%
0,20 - 1,5%	954,2		2,39	2,48	3,66%
0,30 - 0%	883,2		2,21	2,30	3,75%
0,30 - 0,75%	885,7		2,22	2,34	5,21%
0,30 - 1,5%	893,4		2,24	2,38	6,05%

APÊNDICE B

Resultado individual do módulo de elasticidade dinâmico – 28 dias.

Mistura	CP*	Medição 1 (GPa)	Medição 2 (GPa)	Medição 3 (GPa)	Média das medições (GPa)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Desvio (GPa)	CV(%)
0,2 - 0	1	47,22	47,48	47,38	47,36	47,4	0,0	0,0
	2	47,34	47,36	47,38	47,36			
0,2 - 0,75	1	47,78	47,80	47,78	47,79	47,3	0,4	0,9
	2	47,13	47,12	47,14	47,13			
	3	46,97	46,97	46,98	46,97			
0,2 - 1,5	1	46,93	46,89	46,80	46,87	46,8	0,2	0,4
	2	46,80	46,54	46,57	46,64			
0,3 - 0	1	37,10	37,10	37,10	37,10	35,9	1,7	4,7
	2	34,70	34,71	34,74	34,72			
0,3 - 0,75	1	36,21	36,18	36,21	36,20	36,2	0,4	1,0
	2	36,52	36,58	36,58	36,56			
	3	35,84	35,82	35,81	35,82			
0,3 - 1,5	1	37,55	37,45	37,56	37,52	37,3	0,4	1,1
	2	36,79	36,75	36,83	36,79			
	3	37,42	37,57	37,4	37,46			

Resultado individual de resistência à tração na flexão – 28 dias.

Mistura	CP*	Resistência individual	Média (MPa)	Desvio (MPa)	CV (%)
0,2 - 0	1	14,32	13,8	0,7	5,0
	2	13,35			
0,2 - 0,75	1	9,15	10,2	1,0	9,8
	2	11,14			
	3	10,35			
0,2 - 1,5	1	20,88	20,3	0,9	4,4
	2	19,62			
0,3 - 0	1	12,03	10,8	1,7	15,5
	2	9,66			
0,3 - 0,75	1	9,94**	14,3	1,7	12,2
	2	15,54			
	3	13,07			
0,3 - 1,5	1	13,01	13,3	0,6	4,5
	2	13,99			
	3	12,89			

*Alguns espécimes foram danificados na desmoldagem e por isso algumas misturas tiveram apenas dois CPs para serem avaliados.

** Valor espúrio.

Resultado individual de resistência à compressão – 28 dias.

Mistura	CP	Resistência individual	Média (MPa)	Desvio (MPa)	CV (%)
0,2 - 0	1	103,5	106,8	7,2	6,7
	2	101,8			
	3	115,0			
0,2 - 0,75	1	111,2	109,2	1,9	1,8
	2	109,0			
	3	107,3			
0,2 - 1,5	1	118,0	115,7	2,2	1,9
	2	113,6			
	3	115,7			
0,3 - 0	1	72,7	68,3	3,9	5,7
	2	66,9			
	4	65,3			
0,3 - 0	3	69,6	70,8	1,8	2,6
	4	72,9			
	5	69,9			
0,3 - 1,5	1	86,3	84,3	2,2	2,6
	4	82,0			
	5	84,6			